

Antti Ahomäki

# Ajoneuvon alumiinikorin alustava mitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

28.9.2015

Tekijä(t) Otsikko	Antti Ahomäki Ajoneuvon alumiinikorin alustava mitoitus
Sivumäärä Aika	35 sivua 28.9.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Harri Santamala
<p>Tämän työn tarkoituksena oli suunnitella alustavasti ajoneuvon kori, valita valmistusmateriaalit ja tarkastella korin käyttäytymistä ajotilanteissa. Kyseessä on Metropoliasissa alkava uusi autoprojekti.</p> <p>Auton korin valmistuksessa otetaan mallia Fisker Karmasta, jossa on hyödynnetty yksinkertaisia alumiinirakenteita ja niiden antamaa keveyttä. Työ alkoi tutkimalla Fisker Karman koria ja siinä käytettyä valmistusprosessia. Näiden lähtötietojen perusteella alkoi 3D-mallinnus.</p> <p>3D-mallinnuksen valmistuttua korilla aloitettiin FEM-analyysit. Catian GSA-ohjelmalla simuloitiin viisi erilaista koetta, joilla pyrittiin löytämään kehityskohteita alustavasta suunnittelusta. Kohteet raportoitiin ja suunnittelija antoi myös omat ideansa korin parantamisesta seuraaville opiskelijoille, jotka ryhtyvät jatkamaan projektia.</p>	
Avainsanat	Ajoneuvon kori, suunnittelu, mitoitus, FEM, alumiini

Author(s) Title	Antti Ahomäki Preliminary Design of an Aluminum Chassis
Number of Pages Date	35 pages 28 September 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor(s)	Harri Santamala, Project Manager
<p>This Bachelor's thesis deals with the design of a chassis for a new automotive project at Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. The chassis is designed to be a preliminary work for the new project.</p> <p>The idea is to build a new electric vehicle which has a range extender on board. The project is inspired by Fisker Karma. Also some of the design is taken from the Biofore Concept Car project. The work began by studying how aluminum extrusion works and how Fisker Karma chassis was made and designed. After that the work on a 3D model began.</p> <p>After the 3D model was completed and suitable aluminum profiles were found the FEM-modeling was carried out. Five different tests were carried out to determine if the chassis was rigid enough and conclusion was made on how to improve the chassis for the students that continue working on it.</p>	
Keywords	Automotive chassis, design, FEM, aluminum

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Korisuunnittelun historia	2
2.1	Yleistä	2
2.2	Audi Space Frame	3
2.3	Jaguar Light Weight Vehicle Technology	4
2.4	Jälkimarkkinat	6
3	Materiaalin valinta	7
3.1	Teräs	7
3.2	Alumiini	8
4	Valmistusprosessit	11
4.1	Profiilien valmistus	11
4.2	Valmistajan valinta	12
4.3	Muiden osien valmistus	14
5	Liitokset	15
5.1	Niittaus	15
5.2	Liimaus	16
5.3	Hitaus	17
5.3.1	Esikäsittely	18
5.3.2	Lisäaineet ja suojakaasu	18
5.3.3	Tuotanto	18
6	Suunnittelu	20
6.1	Mitoitus	21
6.2	Mallinnus	22
6.3	Profiilijakauma	23
7	Lujuuslaskenta	25
7.1	Lähtökohta	25

7.2	Pohjalaskelma	26
7.2.1	Tapaus 1 Vääntöjännitys	27
7.2.2	Tapaus 2 ja 3 Jarruttaminen	27
7.2.3	Tapaus 4 ja 5 Kaarreaajo	27
7.2.4	Tapaukset 2--5 vertikaalinen vakiokuormitus	28
7.2.5	Yhdistelmäkuormitus	28
7.3	Tuloksien tulkinta	29
8	Lopputulos	31
8.1	Tarvittavat muutokset	32
8.1.1	Akusto	32
8.1.2	Profiilien muotoilu	32
8.1.3	Jousituksen kiinnitys ja toteutus	32
8.2	Yhteenveto	32
	Lähteet	34

## Lyhenteet

GSA	General structural analysis. Catian yleinen laskentatyökalu osien lujuuslaskennalle.
FEM	Finite element method. Matemaattinen tapa laskea lujuuksia.
HSLA	High Strength, Low Alloy. Korkealujuus, niukkaseosteinen.
AHSS	Advanced High Strength Steel. Kehittynyt korkealujuusteräs.
SAE	Society of Automotive Engineers. Ajoneuvosinöörien yhteisö.
ASF	Audi Space Frame
TDI	Turbocharged direct injection. Turboahdettu suorasuihkutusmoottori
GM	General Motors

## 1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä on tarkoituksena suunnitella ja mitoittaa Metropolia Ammattikorkeakoulun uuteen ajoneuvo- projektiin tulevan ajoneuvon kori. Kyseinen ajoneuvo tulee olemaan oppilaitoksen ensimmäinen sähköajoneuvo, joka on tarkoitettu jokapäiväiseen liikenteeseen. Sähköajoneuvojen kysyntä on lisääntynyt voimakkaasti jatkuvasti tiukentuvien ilmastolakien takia ja niiden prosentuaalinen osuus kaikista tiellä liikkuvista ajoneuvoista tulee kasvamaan merkittävästi tulevina vuosina.

Työssä on otettu mallia Valmet Automotiven tehtailla valmistetusta Fisker Karmasta. Ajoneuvon erikoisominaisuuksia olivat vain sähköllä toimiva voimansiirto, johon oli yhdistetty voimakoneena toimiva moottori, jolla pystytään lataamaan ajoneuvon akkuja ja syöttämään energiaa sähkömoottorille kesken ajon. Toinen Fisker Karman ominaisuus, jota halutaan hyödyntää ajoneuvon suunnittelussa, on sen kori. Fisker Karman kori on valmistettu alumiiniprofiileista, joilla saavuteaan hyvin yksinkertainen rakenne ja ajoneuvon massa pysyy alhaisena.

Työssä käydään läpi suunnittelun ja mitoituksen eri vaiheet keskittyen erityisesti ajoneuvon käyttäytymiseen tavallisessa liikenteessä sekä korilta haluttuihin ominaisuuksiin, jotka liittyvät ajoneuvon teknisiin ratkaisuihin. Tärkeintä on tehdä korista riittävän jäykkä, jotta sen ajettavuus on paras mahdollinen. Suunnittelu ja mitoitus tehdään alustavasti, sillä ajoneuvon koria ei ole vielä tarkoitus valmistaa. Työssä myös tarkastellaan käytettävän alumiinin valmistusprosessia. Tämä työ toimii pohjana ajoneuvon jatkosuunnittelua varten.

## 2 Korisuunnittelun historia

### 2.1 Yleistä

Ajoneuvojen korien suunnittelu on kehittynyt merkittävästi autojen elinkaaren aikana. Ennen 1960-lukua lähes kaikki ajoneuvot suunniteltiin kori rungon päällä-konseptilla, jossa alustakomponentit ja voimansiirto kiinnitettiin korin alla kulkevaan tikasmaiseen kehikkoon. Tähän pohjarunkoon kiinnitettiin erikseen matkustamo. Nykyään käytetään ns. unibody-suunnittelua, jossa koko ajoneuvo koostuu yhdestä suuresta korista. Tämä takaa huomattavasti paremman turvallisuuden ajoneuvon sisällä oleville. Tämä rakennelma mahdollistaa kaikkien komponenttien kiinnityksen suoraan koriin. [1, s. 4.]

Teräksiset auton korit ovat perinteisesti peitetty prässätyillä levyillä, jotka on vastushitsattu koriin. Uudet tuotanto menetelmät kuten suurpainemuovaus ja laserhitsaus ovat kuitenkin yhdessä suurlujuusteräksien kanssa tarjonneet paremman jäykkyyden ja turvallisuuden nostamatta korin massaa.

Samoja tekniikoita ei kuitenkaan voida suoraan soveltaa alumiinikoriin. Alumiinista suunniteltaessa on otettava huomioon alumiinin omat suunnitteluominaisuudet. Suunniteltaessa alumiinista koria on otettava huomioon tiettyjen valmistusprosessien kustannukset suunniteltuun tuotantomäärään. Nykyään käytetään kolmea eri alumiinikorityyppiä, jotka ovat

- ekstruusiointensiivinen kori
- Space Frame -rakennelmat sisältäen muovattua ekstruusiota ja ohutseinäisiä valuja
- levyintensiivisiä unibody-rakennelmia [1, s. 6].

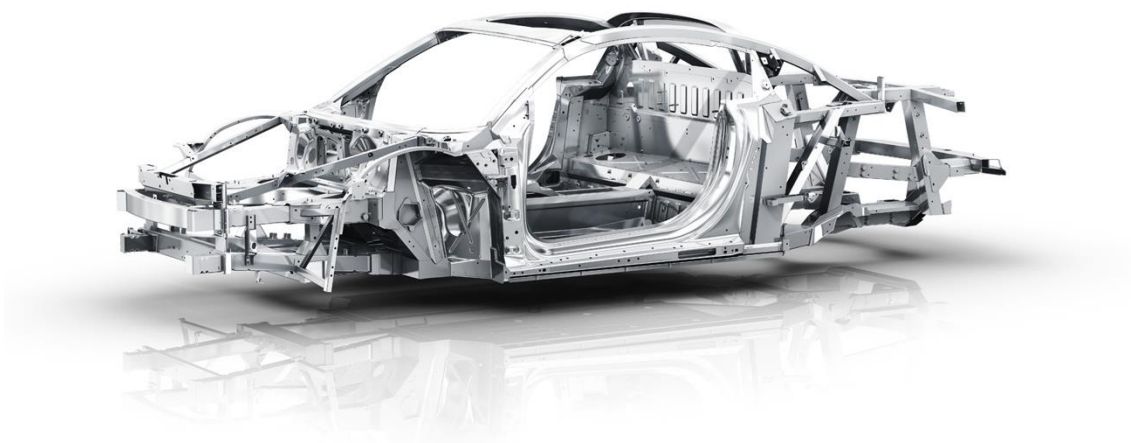


Ensimmäinen sarjatuotantoauto, jossa oli täysin alumiininen monokokkikori, oli Honda Acura NSX (1989). NSX on kahden istuttava urheiluauto. Sitä valmistettiin käsityönä hyvin pieni määrä. Autosta tuli jopa 200 kg kevyempi kuin sen teräsversiosta. Auton valmistuksessa käytettiin piste- ja MIG-hitsausta. Tämän jälkeen myös muut valmistajat lähtivät suunnittelemaan alumiinisia koreja. [1, s. 7.]

## 2.2 Audi Space Frame

Täysin alumiiniseoksista valmistettavien ajoneuvojen korit rajoittuvat lähinnä erittäin harvinaisiin ja kalliisiin ajoneuvoihin. Varsinkin saksalainen Audi on toiminut pioneerinä alumiinikorien kehityksessä. Audi Space Frame on Audin alumiinikori, joka esiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 1994. Audi Space Framen idea piilee siinä, että se määrää tietyn tehtävän tietylle materiaalille ja komponentille. Tämä antaa suunnitteluinsinööreille vapaammat kädet toimia.

ASF on tällä hetkellä käytössä vain Audi A8- ja R8-autoissa eli valmistajan kaikista kalleimmissa luksusautoissa. ASF:n etu vastaavaan teräsrakenteeseen on sen jopa yli 40 % pienempi massa. Varsinkin Audin R8-mallissa on käytetty suulakepuristettuja profiileja. Näiden osuus lähes viimeistellyistä komponenteista on 70 %. ASF mahdollistaa useita muutoksia ajoneuvon suunnittelussa, kuten kompaktimmat jarrut, pienemmän moottorin, pienemmän pakoputkiston ja pienemmän polttoainetankin. Kuvassa 1 on esitetty Audi R8 Space Frame.



Kuva 1. Audi R8 Space Frame [2]

Audi oli ensimmäinen suuri ajoneuvovalmistaja, joka kokeili ajoneuvon korin valmistamista alumiinista massatuotantona autossa. Audin A2-malli, jota valmistettiin vuodesta 1999 vuoteen 2005, oli rohkea kokeilu. Siinä käytettiin myös Audin aiemmin julkaisemaa ASF-konseptia. Varsinkin Audi A2 1.2 TDI -moottorilla oli erittäin polttoainetaloudellinen auto. Auton keskilukulutukseksi mitattiin alle 3 litraa sadalla kilometrillä. Ajoneuvon ongelmaksi muodostuivat kuitenkin sen kalliit tuotantokustannukset, ja mallin valmistus on sittemmin lakkautettu.

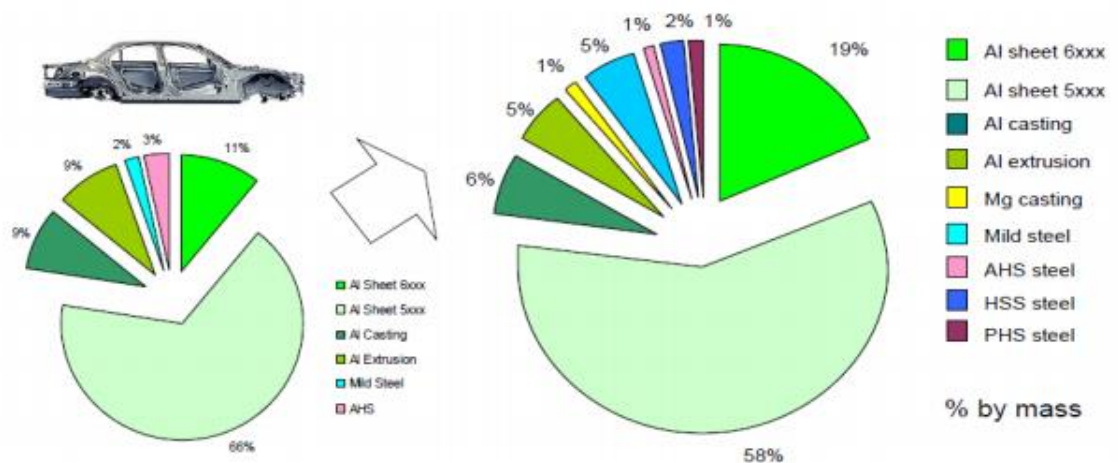
Audi ei kuitenkaan luovuttanut tähän vaan nykyään yleisimmissä A6- ja A7-malleissa sovelletaan ASF-konseptia. Vuoden 2010 loppuun mennessä Audi oli valmistanut yhteensä yli 550 tuhatta ajoneuvoa, jossa käytettiin ASF koria. Tämä on huomattavasti enemmän kuin yksikään muu ajoneuvon valmistaja. [2]

### 2.3 Jaguar Light Weight Vehicle Technology

Toinen merkittävä teollinen läpimurto alumiinilevyjen monokokkisuunnittelussa tehtiin Jaguar XJ (X350) -mallin kanssa. Sen suunnittelu- ja valmistusprosessi saatiin toimimaan suuressa tuotantomäärässä (yli 100000 ajoneuvoa vuodessa). Ajoneuvon korin suunnittelussa nähtiin ensimmäisen kerran itselävistäviä niittejä ja epoksiliimausta yhdessä alumiinivalujen ja -profiilien kanssa. Uudesta XJ:stä tuli 200 kg kevyempi kuin aiemmasta mallista, vaikka uusi auto oli pidempi, korkeampi ja leveämpi kuin sen

edeltäjä. Uusi kori oli myös 60 % jäykempi kuin edellinen, mikä tarjoaa parempaa kestävyyttä ja ajettavuutta. [1, s. 11.]

Seuraavassa XJ-mallissa Jaguar yhä jatkokehitti omaa kevytteknologiaansa. 50 % korin alumiinista saadaan kierrätetystä materiaalista. Niittien ja osien määrää on vähennetty esimerkiksi valamalla suurempia yksittäisiä kappaleita. Tärkeimmät kehityskohteet olivat kuitenkin uusien, yhä vahvempien alumiiniseoksien käyttö, joka on esitetty kuvassa 2. Myös yhä useampi osa korista on liimattu tai niitattu yhteen. Uudella tuotantolinjalla luovuttiin täysin MIG-hitsauksesta. [1, s. 13.]



Kuva 2. Jaguar X350:n (vasen) ja X351:n materiaalien erot [1, s. 14]

## 2.4 Jälkimarkkinat

Ajoneuvovalmistajien jatkuva korien kehitys tuo yhä useampiin perusautoihin myös alumiinin ja muut kevytmetallit. Kuluttaja ei todennäköisesti ymmärrä autoa ostaessa, että hän on hankkimassa alumiinikorista ajoneuvoa, jollainen voi aiheuttaa ylimääräistä päänsaivaa jälkimarkkinoilla. Varsinkin alumiinikorivaurioiden korjaaminen on huomattavasti haastavampaa kuin teräksen johtuen erilaisesta valmistusprosessista. Hyvä esimerkki autosta, jossa tämä tilanne tulee esiintymään, on yksi Yhdysvaltojen markkinoiden myydyimmistä autoista Ford F150, jonka uudessa mallissa tulee olemaan alumiinikori. [3]

### 3 Materiaalin valinta

Suunnittelun pohjana toimi tilaajan päätös käyttää mahdollisimman paljon suulakepuristettua alumiinia. Prosessia voidaan käyttää erittäin monen eri materiaalin kanssa ja sovelletaan metalleista aina muoveihin asti. Alumiiniseokset ovat yleisimmin suulakepuristettuja metalleja. Ajoneuvojen päästövaatimuksien lisääntyessä ajoneuvojenvalmistajat ovat pyrkineet pienentämään ajoneuvojen massoja, jotta päästöt ja polttoainekulutus eivät kasvaisi liian suuriksi. Kehittyneet valmistusprosessit ovat lisänneet alumiininseoksien, sekä muiden kevytmetalliseoksien käyttöä.

#### 3.1 Teräs

Teräs on ollut jo pitkään ajoneuvojen valmistuksessa erittäin tärkeä raaka-aine. Teräksen tarjoama erittäin laaja ominaisuusalue murto- ja myötölujuuden kannalta, sekä sen helppo saatavuus ja hinta ovat taanneet sille varman paikan ajoneuvojen korien valmistuksessa. Ennen terästä käytettiin kuitenkin valurautaa, josta nykyään pyritään pääsemään eroon kaikin mahdollisin keinoin. Varsinkin moottorin lohkoissa yleinen valurauta on korvaantumassa alumiinilla. Valurautaa on myös aiemmin käytetty muissa auton osissa, mutta se on lähes täysin korvattu kevyemmillä materiaaleilla.

Tyypillinen valinta teräkseksi on ruostumaton teräs, joka sisältää yli 10,5 % kromia. Hyvä korroosionkestävyys perustuu teräksen pintaan muodostuvaan kromioksidien kerrokseen. Toinen ajoneuvojen koreissa käytettävä teräs on matalahiili teräkset. Niissä hiilen osuus on alle 0,25 %. Ominaisuuksiltaan pehmeillä ja matalalujuuksilla matalahiiliteräksillä on hyvä muodonmuutoskyky ja sitkeys. Ne ovat helposti koneistettavissa ja hitsattavissa sekä ne ovat halvimpien terästen joukossa. [4].

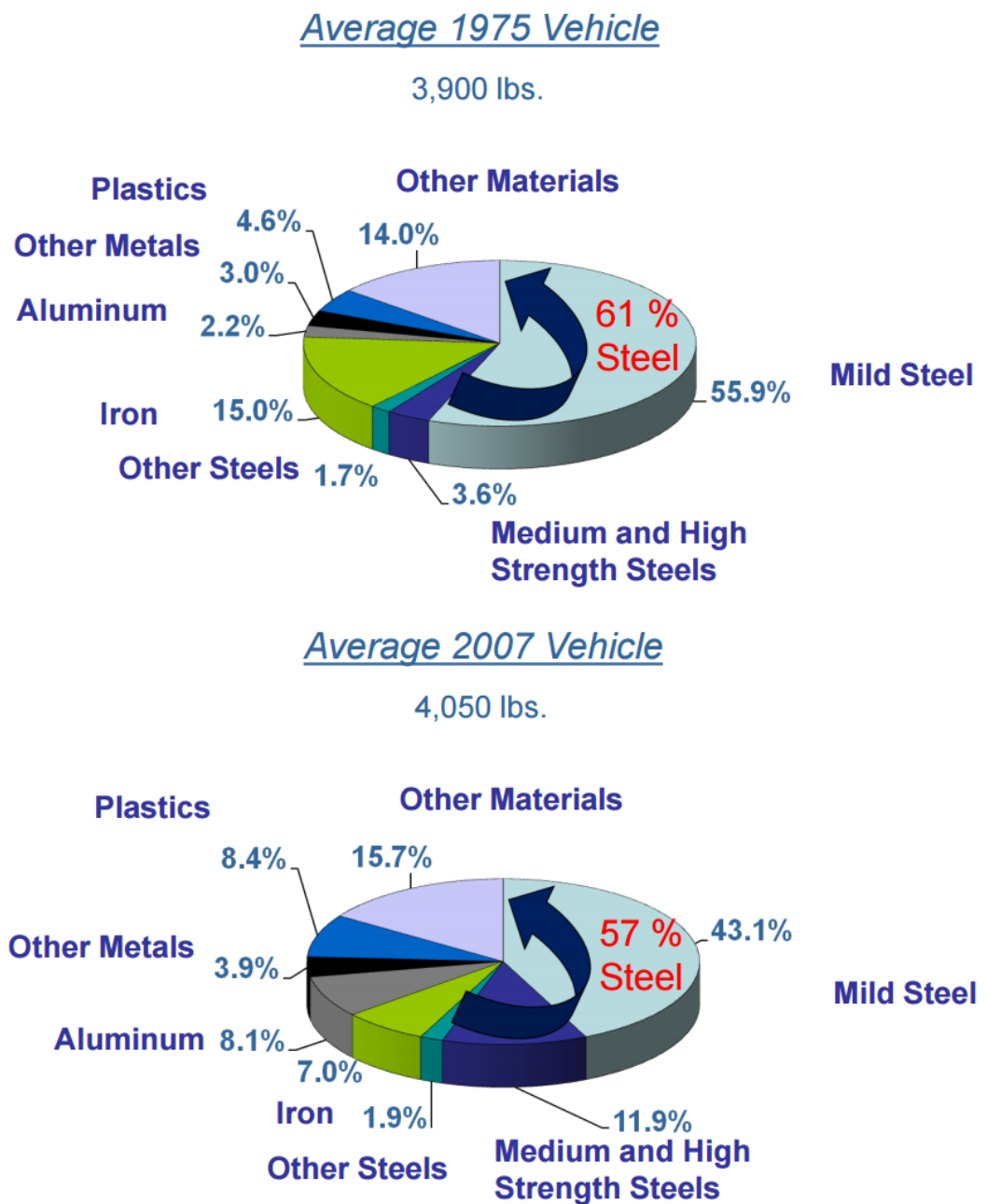
Muita teräsvalintoja ovat perinteiset suurlujuusteräkset, joiden lujuusominaisuudet perustuvat valtaosin mikroseostukseen ja erkautuskarkaisukäsittelyllä saavutettuun korkeaan lujuuteen. Perinteistä suurlujuus-HSLA-laatuja on käytetty eniten liikkuvan kaluston rakenteissa. Näiden suosituksia ajoneuvoteollisuudessa käsittelee yleiset SAE-standardit. Perinteiset suurlujuusteräksien myötöraja on alle 500 Mpa. [4; 5, s. 9.]

Ajoneuvoissa myös yhä voimakkaammin yleistynyt materiaali on kehittynyt suurlujuusteräs. Erittäin korkeat lujuusarvot saavutetaan marensiittireaktion avulla. Suurlujuusteräksien sijoitus ajoneuvon korissa on nimenomaan matkustamon ympärillä. Näiden teräksien on tarkoitus estää matkustamon muodonmuutokset, jolloin korin keulassa ja perässä olevat pehmeämmät materiaalit ottavat vastaan suurimman osan törmäyksen energiasta. Suurlujuusteräksien etuja ovat lujuuden sallima vapaampi suunnittelu eli sama lujuus saavutetaan pienemällä määrällä materiaalia. Toisaalta taas suurlujuusteräksien muotoilu ja käsittely on hyvin haastavaa, johtuen niiden pienestä murtovenymästä. [5, s. 191--202.]

### 3.2 Alumiini

Ajoneuvojen koko on kuitenkin kasvanut jatkuvasti ja entiset pienet mallit ovat nykyään keskikoon malleja. Myös tiukentuneet päästörajoitukset ovat johtaneet yhä pienempien moottorien käyttöön ajoneuvoissa ja vapaasti hengittävät moottorit on korvattu turboahdetuilla moottoreilla. Kolmantena ajoneuvojen massaa nostavana tekijänä on tekniikan huima kehitys, joka on tuonut kymmenittäin uusia lisävarusteita ja turvalaitteita ajoneuvoihin.

Kaikki tämä kehitys on saanut kevytmetallien suosion ajoneuvovalmistajien keskuudessa kasvamaan ja yhä useammin perinteisiä teräsrakenteita on korvattu alumiini- tai magnesiumseoksilla. Kevytmetallien valmistusprosessien kehittyessä ja raaka-aine- kustannusten pienentyessä näiden materiaalien käyttö on yhä houkuttelevampaa. Kuvassa 3 on verrattu ajoneuvon materiaalijakaumaa 1970- ja 2000-luvuilla. Kuvasta havaitaan teräksen ja raudan osuuden pieneneminen sekä korkealujuusteräksien ja kevytmetallien osuuden kasvu.



Kuva 3. Ajoneuvon materiaali-jakauman muutos [7]

Alumiiniseoksilla on myös teräkseen nähden useita etuja, joista merkittävin on sen paino. Alumiiniseosten tiheys on noin  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , kun taas esimerkiksi teräksen tiheys on noin  $7,2 \text{ g/cm}^3$  riippuen seoksesta. Keveys tekee myös alumiiniekstruusioista helpompia käsitellä ja kuljettaa. Alumiinille on myös ominaista sen kimmoisuus, joka mahdollistaa alumiinin hetkellisen taipumisen esimerkiksi onnettomuustilanteessa, minkä jälkeen se palaa alkuperäiseen muotoon.

Muita merkittäviä etuja alumiinin käytössä ovat erittäin hyvä korroosionkestävyys, työstettävyys ja hitsattavuus, joka on seurausta hitsausvyöhykkeen alhaisemmista lujuusarvoista. [6, s. 2.]

Ajoneuvon yksinkertainen rakenne tulee vaatimaan paljon liittämistä, jolloin helppo käsiteltävyys korostuu materiaalin valinnassa. Alumiini seostetaan aina, jotta sille saadaan parempi mekaaninen kestävyys. Tyypillisiä seosaineita ovat pii, kupari, magnesium, rauta, mangaani, sinkki ja nikkeli. Alumiiniseokset on määriteltä standardissa SFS-EN 1706. [6, s. 8.] Alumiinin valinta valmistusmateriaaliksi projektille ei ollut helppoa, mutta tavoitteena on kuitenkin aina oppia jotain uutta ja korin valmistaminen alumiinista tarjoaa oivan mahdollisuuden siihen.

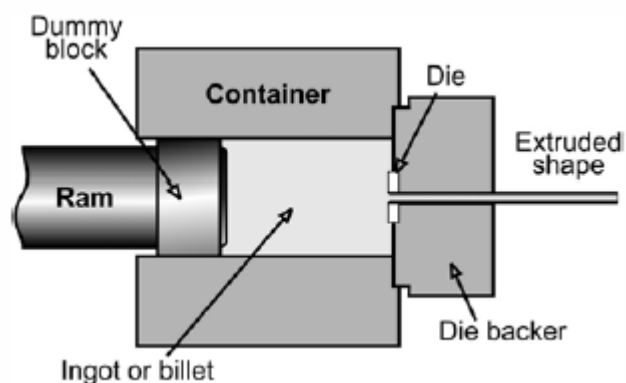


## 4 Valmistusprosessit

### 4.1 Profiilien valmistus

Suulakepuristus eli ekstruusio on prosessi, jossa alumiiniseosharkko puristetaan teräsmuotin läpi. Prosessin etuja tavalliseen valamiseen verrattuna ovat tarkat mittatoleranssit, valukappaleiden ohuet muodot ja tuotetta ei tarvitse koneistaa valun jälkeen. Suulakepuristuksessa voidaan myös suunnitella profiileja, jotka parantavat valmiin kappaleen kestävyttä halutulla alueella. Suulakepuristus voidaan suorittaa kylmä- ja kuumakammiomenetelmillä, joista kylmäkammiomenetelmä on yleisempi alumiinien kohdalla. [6, s. 12.]

Suulakepuristusprosessin pääkomponentit ja prosessin toiminta on esitetty kuvassa 4. Alumiiniseosharkko pidetään valukoneen vieressä olevassa kuumanapitouunissa. Valukoneen mäntä on aina vaakasuorassa asennossa ja sillä on suora yhteys muottiin. Harkko annostellaan uunista valukammioon, minkä jälkeen hydraulinen mäntä työntää jäljitelmäkappaletta harkon takana kunnes harkko on täyttänyt valujärjestelmän valuportille saakka. Tämän jälkeen harkko puristetaan hitaasti teräsmuotin läpi ja syntyy muotin mukaista alumiiniprofiilia. Profiili jäähdytetään vedellä tai ilmalla ennen kuin se venytetään. Venytyksellä pyritään suoristamaan profiili ja oikaisemaan muodostuneita painevaluvirheitä. [6, s. 12.]



Kuva 4. Suulakepuristusprosessin pääkomponentit [8, s. 296]

Lopuksi valmiille suulakepuristuskappaleille voidaan tehdä lämpökäsittely. Lämpökäsittelyllä pyritään parantamaan valukappaleiden mekaanisia ominaisuuksia esimerkiksi muuttamaan kappaleen murtolujuutta, sitkeyttä ja myötörajaa. Ei ole kuitenkaan tavallista lämpökäsitellä painevalukappaleita, mutta se on kuitenkin mahdollista, jos huokoisuus on pientä. [6, s. 12.]

Painevaluprosessin pahin ongelma on muottien kalleus ja mahdolliset suunnitteluvirheet muotissa, jotka voivat pilata yhden tuotantoerän. Kokonaistuotantomäärät ovatkin suuria ja suunnittelussa tulee ottaa huomioon tämä käyttämällä vain muutamaa erikokoista painevalua. Samalla pyritään pitämään kustannukset mahdollisimman pieninä. Alumiini on myös lähes täysin kierrätettävää materiaalia. [6, s. 13.]

#### 4.2 Valmistajan valinta

Suunnittelussa on käytetty pohjana Ruukin alumiini AW-6082-T6- ja AW-6063-T6-alumiiniprofiileja, joiden pohjalta on luotu alumiiniprofiilit Catian 3D-malliin. Materiaalin tekniset tiedot ovat nähtävissä taulukossa 1. Ruukki on ollut tavarantoimittajana ennenkin Metropolian autoprojekteissa, ja tämä takaa halutuille profiileille varman saatavuuden. Edellä mainitut alumiiniseokset soveltuvat hyvin suulakepuristukseen ja tarjoavat riittävän myötö- ja vetolujuuden. Niiden hiukan erilaiset vahvuudet tarjoavat mahdollisuuden törmäysvyöhykkeiden luomiseen. Valitut materiaalit täyttävät EN 573-3-materiaalistandardin, mekaaniset ominaisuudet-standardin EN 755-2, toleranssit standardin EN 755-7 mukaan ja ainetodistus EN 10204 / 2,1. [9; 10]

Taulukko 1. Valittujen materiaalien tiedot [9 ; 10]

	AW-6082-T6	AW-6063-T6	Yksikkö
Tiheys	2,71	2,7	g/cm <sup>3</sup>
Kimmokerroin	70	69,5	GPa
Poissonin suhde	0,33	0,33	
Myötöraja	250	160	Mpa

Taulukossa 2 on esitetty erilaisten seoksien eroavaisuuksia. Varsinkin 6000-sarjan alumiiniseokset ovat hyvin monipuolisia, lämpökäsiteltäviä, hitsattavia ja niillä on kohtalaisen korkea lujuus sekä loistava korroosionkestävyys. 6000-sarjan alumiiniseoksien tärkeimmät seosaineet ovat pii ja magnesium. Vastaavasti 4000-sarjan pääseosaine on pii, joka alentaa seoksen sulamispistettä. AW 4043 onkin yleisimmin käytetty täydennysaine 6000-sarjan alumiinien hitsaamiseen. [11]

Taulukko 2. Seosaineiden vaikutus lopputuotteeseen [12]

Seosaine	Vaikutus
Sinkki	Antaa magnesiumin ja kuparin kanssa suuren lujuuden
Kupari	Parantaa lujuutta
Mangaani	Alentaa sulamisaluetta ja parantaa juoksevuutta
Pii	Lisää lujuutta menettämättä oleellista sitkeyttä
Magnesium	Lisää lujuutta menettämättä oleellista korroosionkestävyyttä
Magnesium/pii	Lisää lujuutta, muokattavuutta ja pursotettavuutta menettämättä oleellista korroosion kestävyttä

#### 4.3 Muiden osien valmistus

Muita osia, joita korin valmistuksessa käytetään, ovat levyt. Levyt valmistetaan alumiiniharkoista. Harkot kulkevat linjastolla, jossa niihin kohdistetaan suuri paine pyörivistä rullista. Tätä toistetaan, kunnes ne painuvat halutun paksuisiksi levyiksi. Levyt leikataan oikean kokoisiksi plasmaleikkurilla. Tämä menetelmä sopii jopa 200 mm paksuille levyille. Plasmaleikkauksen ongelma on epätasainen leikkausjälki, joka kuitenkin paranee leikkausnopeuden kasvaessa. Toinen leikkaustapa on laserleikkaus. Laserleikkaus tarjoaa huomattavasti paremman leikkausjäljen, mutta sitä ei voida soveltaa kuin 10 mm paksuihin levyihin. Levyjä voidaan myös taivuttaa särmäystekniikalla. [13, s. 12.]

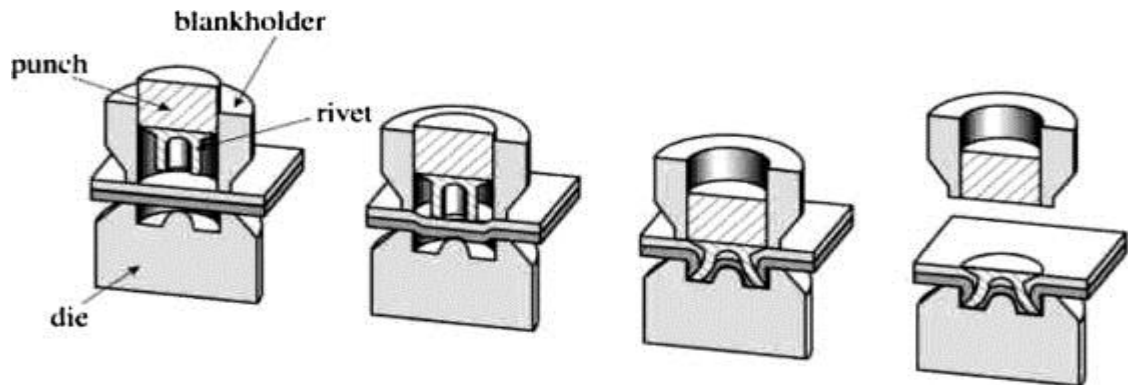
Toinen ryhmä on valetut kappaleet. Valamista käytetään, kun halutaan saada aikaiseksi kappale, joka muuten vaatisi useita liitoksia ja osia sen luomiseksi. Valaminen tapahtuu teräsmuottiin, jolloin lopputuote ei tarvitse juuri lainkaan loppukäsittelyä ja samaa muottia voidaan käyttää uudestaan. Tämä on yleisin valamistekniikka massatuotanto-osissa.

## 5 Liitokset

Levyintensiivisen monokokki- tai unibody-korin toteuttaminen vaatii merkittävän määrän liitoksia. Siitä seurauksena liitostavalla on suuria vaikutuksia siihen, millainen lopputuote tulee olemaan. Varsinkin jäykkyys, ääni, värinä ja kovuus sekä kolarointikyky muodostuvat siitä, miten eri liitokset on toteutettu. Suurin ero alumiini- ja teräskorien välillä on vallitseva liitostapa. Alumiinilla on korkea sähkö- ja lämpöjohtuvuus sekä matala sähköresistiivisyys toisin kuin teräksellä. Taulukossa 3 on käyty läpi Jaguarin ajoneuvoissa esiintyviä liitoksia ja niiden määriä. Taulukosta voidaan havaita se, että hitsisauman määrä alumiinikorissa on hyvin pieni verrattuna perinteiseen teräskoriin. [1, s. 9.]

### 5.1 Niittaus

Tärkein läpimurto alumiinisten korien valmistuksessa on kuitenkin ollut pitkälle kehitetyt mekaaniset liittämiskeinot. Varsinkin itse lävistävien niittien kehittäminen on laajentanut valmistus mahdollisuuksia huomattavasti. Niittiliitokset ovat vähemmän energiantensiivisiä kuin pistehitsaus, ja prosessi voidaan lähes täysin automatisoida. Niiteillä voidaan saavuttaa korkeampi väsymiskestävyys kuin pistehitsausliitoksilla. Niittauksella voidaan myös yhdistää kahta eri materiaalia keskenään ja sen kanssa käytetään yleensä liimausta. Prosessissa niitti lävistää ensimmäisen materiaalin täysin, mutta ei kuitenkaan lävistä pohjamateriaalia. Tämä on havainnollistettu kuvassa 5. Niitit valmistetaan yleensä teräksestä, mikä hankaloittaa materiaalin kierrätystä. [1, s.10; 14]



Kuva 5. Niittausprosessi [14]

## 5.2 Liimaus

Liitosten ominaisuuksia voidaan parantaa huomattavasti käyttämällä lämpökäsiteltyä epoksiliimaa. Normaalisti liimaliitokset sovitetaan lineaarisessa muodossa. Tällaiset liitokset osoittavat erinomaisia jäykkyy- ja sitkeysominaisuuksia, mutta yleensä niitä käytetään hitsausliitoksien, niittauksen tai muiden mekaanisten liitoksien yhteydessä. Tämä sen takia, että liitokset eivät petä suuren epämuodostumisen aikana, esim. nokkakolari. Liimaliitokset edellyttävät pintakäsittelyn ennen niiden levittämistä, jotta lopputulos olisi tarpeeksi kestävä. [1, s. 10.]

Taulukko 3. Jaguar-ajoneuvojen liitoksien määrä ja tyyppi sekä eri valmistusmenetelmillä tehtyjen osien jako [1, s. 18]

	XJ sedan (X350)	XK coupe	XK convertible
<b>Number of parts (total)</b>	<b>241</b>	<b>267</b>	<b>257</b>
Sheet panels	230	201	195
Extrusions	14	42	40
Castings	11	24	22
<b>Number of joints (total)</b>	<b>3287</b>	<b>2938</b>	<b>2741</b>
Self-piercing rivets	3185	2620	2620
MIG weld (m)	0.65	0.5	n/a
Blind rivets (EJOT)	102	283	283
<b>Adhesive bonds (m) (total)</b>	<b>116</b>	<b>99</b>	<b>99</b>
1K epoxy (m)	100	55	55
2K epoxy (m)	n/a	33	33
Rubber based (m)	16	11	11

### 5.3 Hitaus

Alumiini on lähes aina seostettu toisten metallien kanssa, mistä johtuu sen huomattavasti haastavampi hitsattavuus kuin teräksen. Eri alumiiniseokset sopivat hitsattaviksi eri tavoin. Seokset voidaan jakaa ryhmiin niiden murtoherkkyyden perusteella. Alumiini on huomattavasti herkempi muodonmuutoksille kuin teräs ominaisuuksiensa vuoksi. Muodonmuutosten välttämiseksi on käytettävä suurta hitsausnopeutta ja pieni lämmön määrä. Hitsausjärjestyksen tulee myös olla mahdollisimman symmetrinen. [13, s. 5 — 6.]

MIG-hitsausta käytetään rakenteellisiin alumiinikomponentteihin. Näitä ovat muun muassa ekstrusioidut, valetut kappaleet ja yli 2 mm paksut levyt. Sama koskee myös laser-hitsausta, mutta sitä voidaan myös käyttää ohuempien levyjen hitsaukseen. Laserhitsauksen etuja muihin hitsausmenetelmiin on se, että se on helposti automatisoitavissa tuotantolinjassa. Nämä liitostekniikat sopivat parhaiten tilanteisiin, joissa kappale voidaan liittää vain toiselta puolelta tai kun tarvitaan pitkä yhtenäinen

liitos. Myös kitkahitsaus voidaan hyödyntää näissä tapauksissa. Perinteistä pistehitsausta on vaikeaa käyttää alumiinin liittämiseksi. Tämä kuitenkin onnistuu Fronius DeltaSpot -hitsauksella, jossa robotti on varustettu hitsauspistoolilla ja siihen on kiinnitetty prosessiteippi, joka kulkee elektrodien ja liitettävän materiaalin välissä. [1, s. 9.]

### 5.3.1 Esikäsittely

Alumiinia hitsatessa on tärkeää muistaa materiaalin puhtaus. Rasvassa, öljyssä ja kosteudessa on vetyä, joka voi kertyä alumiinin pinnassa olevaan alumiinioksidiin. Alumiinioksidin sulamispiste on niin korkea, ettei se sula hitsatessa, ja tämä voi aiheuttaa hitsausvirheitä. Paras lopputulos saadaan, kun hitsattavan materiaalin pinta puhdistetaan ennen aloittamista kemiallisesti alkoholilla tai asetonilla tai mekaanisesti ruostumattomalla teräsharjalla. Myös hiekkapuhallusta tai hiontaa voidaan käyttää. Hitsaus tulee suorittaa 1--2 tunnin kuluttua puhdistuksesta tai muuten oksidikerros alkaa palautumaan. [13, s. 6–11.]

### 5.3.2 Lisäaineet ja suojakaasu

Käytettävällä lisäaineella ja suojakaasulla on suuri merkitys saatavaan lopputuotteeseen. MIG- ja TIG-hitsauksessa tulee valita oikeanlainen lisäaine, jotta päästään lujuudelta ja korroosionkestävyydeltä hyvään lopputulokseen. Suojakaasu vaikuttaa hitsausnopeuteen, hitsin geometriaan, mekaanisiin ominaisuuksiin ja korroosionkestävyyteen. Alumiinin kanssa ei voida käyttää samoja suojakaasuja kuin teräksen hitsauksessa. Mikäli mahdollista olisi myös hyvä käyttää erillisiä työkaluja alumiinin hitsaukseen. [13, s. 6–11.]

### 5.3.3 Tuotanto

Tyypillisesti ajoneuvojen valmistetaan tuotantolinjalla, jossa robotit aloittavat valmistuksen hitsaamalla ajoneuvon korin kasaan. Tämän jälkeen koriin kiinnitetään kaikki muut oleelliset komponentit. Alumiininhitsauksen haastavuudet ovat kuitenkin tuoneet niittauksen ja liimauksen osaksi korien valmistusta. Kokonaisen tuotantolinjan muuttaminen täysin erilaiseksi maksaa ajoneuvonvalmistajille miljoonia dollareita. Tästä

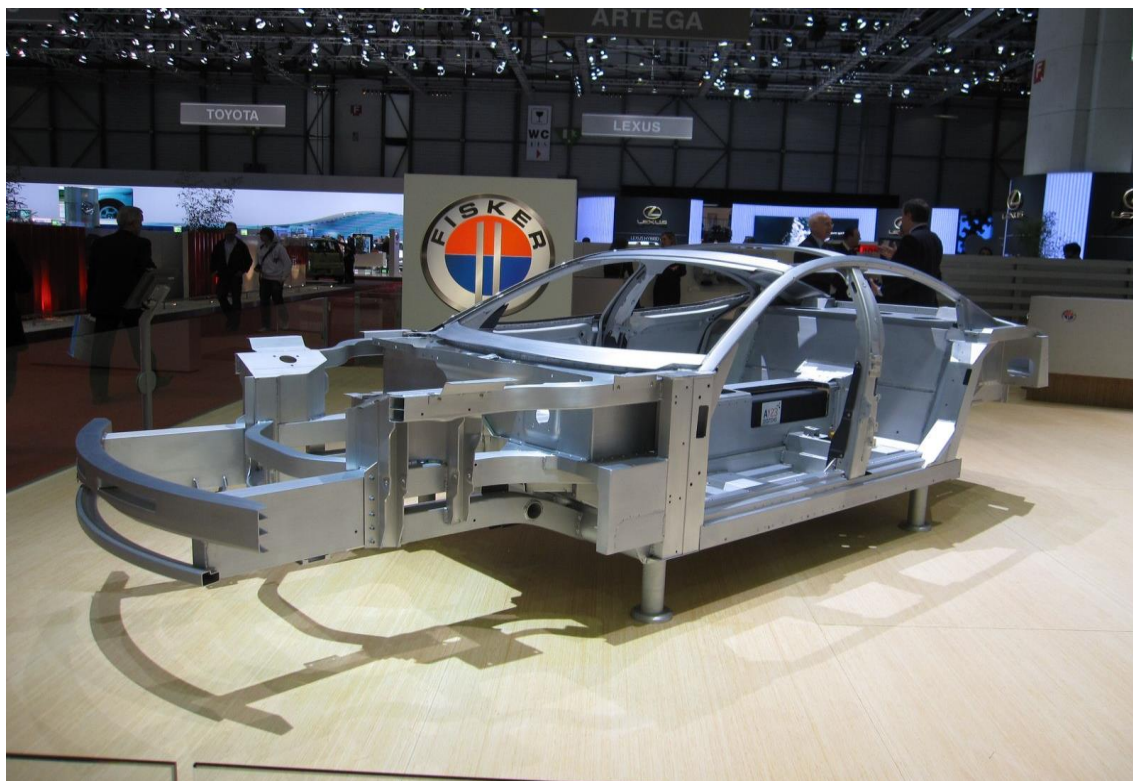


esimerkkinä Ford, joka muutti Dearbornin tuotantolaitoksensa uutta F150-autoa varten. Perinteinen hitsauslinjasto korvattiin niittauksella ja liimauksella lähes täysin. Ford menetti kymmenen viikon tuotannon ja noin 359 miljoonaa dollaria.

Vastaavasti General Motors kehitti uuden hitsaustekniikan, jotta sama hitsaustuotantolinja voidaan säilyttää. Perinteisiä hitsausrobotteja muokattiin niin, että hitsausaseisiin lisättiin kuparista tehdyt korkit. Korkkien päässä on kaiverrus, joka estää alumiinioksidin pääsyn hitsausaumaan. Toinen muutos oli jäähdytysjärjestelmän lisääminen kuparikorkkeihin ja lisää muuntajia tarjoamaan tarpeeksi jännitettä alumiinin hitsaamiseksi. GM:n mukaan hitsisaumoista tulee kestäviä ja vahvoja. [15]

## 6 Suunnittelu

Suunnittelun pohjana toimi edellä mainittujen suulakepuristusmateriaalien käytön lisäksi tilaajan antama pintamalli, jonka sisälle ajoneuvon korin tulisi mahtua. Lisäksi alkutietona oli akkupaketin, moottorin, voimansiirron, ratin, rattiakselin ja etupyörän koko sekä etupyörän jousitus ratkaisu. Annetut ratkaisut on kopioitu oppilaitoksen aikaisemmista ajoneuvo -projekteista eivätkä esitä lopullista ratkaisua. Suunnittelussa haluttiin erityisesti ottaa mallia Fisker Karman korista kuvassa 6 ja siinä käytetyissä yksinkertaisissa rakenteissa. Huomattavana erona ajoneuvojen välillä on kuitenkin se, että ajoneuvoprojektin autosta tulisi neljän hengen perheauto eikä urheiluauto.

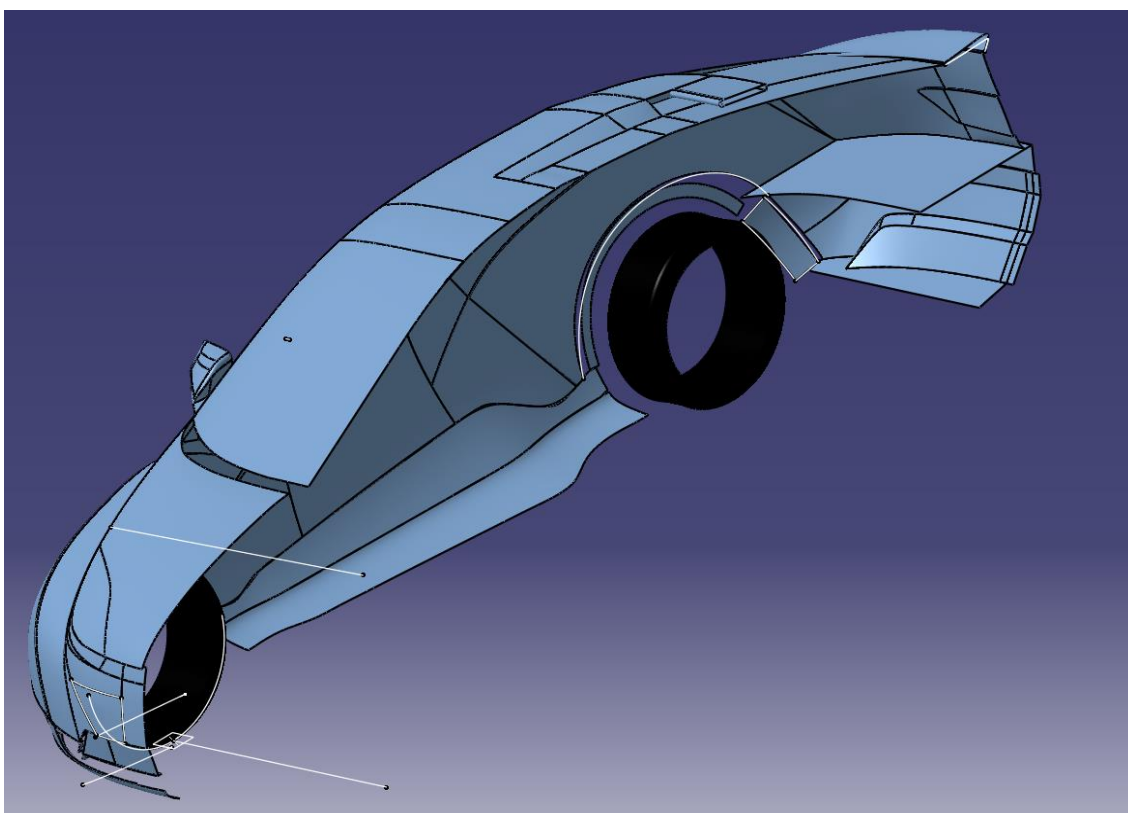


Kuva 6. Fisker Karman kori [16]

## 6.1 Mitoitus

Mitoituksen tarkoituksena oli luoda alustavat arvot ja sijainnit korin osien sijainnille sekä tarjota hyvät lähtökohdat ajoneuvoprojektin jatkokehitystä varten. Mitoituksen pohjana käytettiin tilaajan antamaa alustavaa pintamallia ajoneuvosta. Pintamalli tarjoaa alustavat ulkomitat ja muodot, joita ajoneuvon tulisi noudattaa. Myös muiden aikaisemmin mainittujen komponenttien sijainti tulisi ottaa huomioon suunnittelussa ja mahdollisuuksien mukaan siirtää niitä, jos siihen on tarvetta.

Työ aloitettiin tekemällä alustava malli ajoneuvon korista käyttämällä Catian Solid-työkaluja. Solid-työkaluilla luotiin neliön ja suorakaiteen muotoisia palkkeja, jotka pyrittiin saamaan mahtumaan annetun pintamallin sisälle. Työtä tehtiin aluksi lähinnä kokeilemalla ja etsimällä pisteitä, joista palkit voivat alkaa ja joihin ne voivat päättyä ilman, että ne lävistävät pintamallia kuvassa 7. Mitoitusta tehdessä ja palkkien muotoja valitessa tuli pitää mielessä mahdollisimman yksinkertainen rakenne valmistusteknisistä syistä.

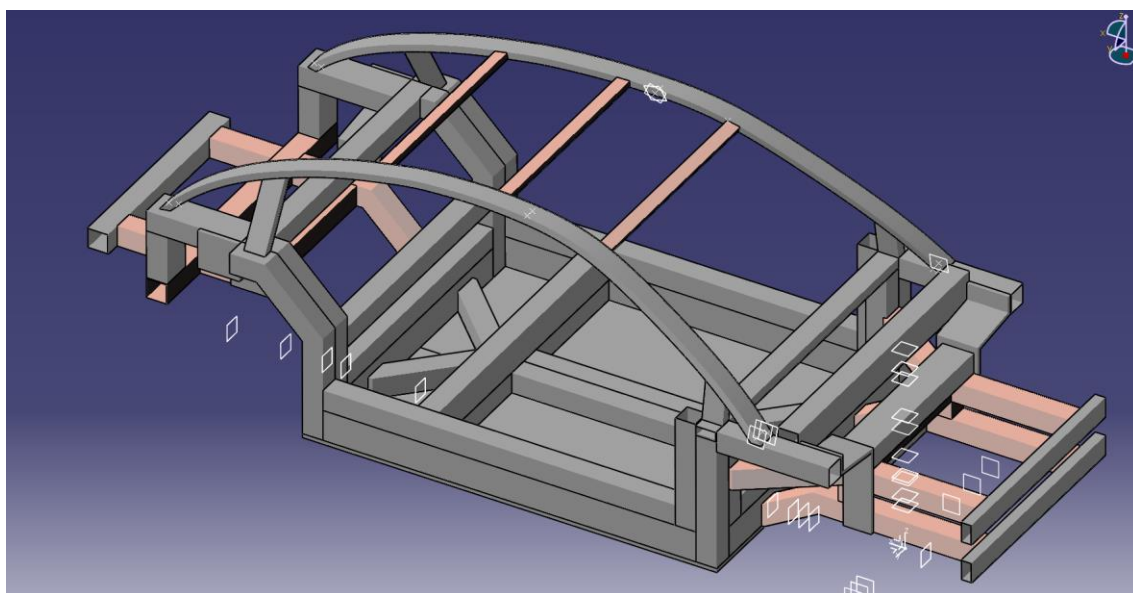


Kuva 7. Alustavan pintamallin poikkileikkaus

Alustavan mallin teon aikana valittiin sopivalta valmistajalta heidän alumiiniprofiilikirjasto, josta voitiin valita sopivankokoisia profiileita alustavaan malliin. Tavoitteena oli tehdä lähes kaikista palkeista samankokoisia, jotta valmistuskustannukset olisivat mahdollisimman pienet. Alustava versio pyrittiin tekemään mahdollisimman valmiiksi ennen kuin palkkeja aloitettiin muuttamaan profiileiksi. Alustavassa mallissa voitiin myös käyttää Catian Mirror-toimintoa, jolla voitiin peilata palkkeja tasojen mukaan. Tämä nopeutti huomattavasti alustavan mallin tekemistä, sillä muutoksien tekeminen oli nopeampaa. Lopullisessa mallissa kaikki palkit ovat omina osinaan.

## 6.2 Mallinnus

Projektin tilaaja on tehnyt ajoneuvolle valintoja komponenttien sijainnista ja muista toteutuksista. Tämä tuli ottaa huomioon suunnittelussa, ja se vaikutti merkittävästi siihen, millainen korista lopulta tuli. Lopullinen korimalli on nähtävissä kuvassa 8. Ajoneuvon keskiosassa merkittävimpiä asioita ovat akkupaketin sijoitus ajoneuvon lattiaan, jolloin täytyi ottaa huomioon sille varattu tilavuus. Tämä ratkaisu teki ajoneuvon lattiasta hyvin paksun ja rajoitti sinne mahtuvien korin tukielementtien muotoa ja määrää. Toinen huomattava asia on B-pilareiden sijoittaminen oviin. Tämä tarkoitti sitä, että ne eivät kuulu alustavan korin suunnitteluun.



Kuva 8. Alustavasti suunniteltu kori. Värit kuvaavat käytettyjä alumiinilaatuja.

Takaosassa taas tavoitteena on tehdä autosta viistoperäinen, jolloin takaluukku aukeaa ikkunan kanssa. Tämä jättää korin kohtuu aukinaiseksi takaosasta ja onkin tärkeää valita riittävän lujat materiaalit takaosaan. Edessä ja takana jousitukseksi valittiin alustavasti MacPhersonin jousitus. Ajoneuvon etuosassa taas tilaa jätettiin sähkö- ja generaattorimoottorille sekä ohjaustangolle ja rattiakselille.

### 6.3 Profiilijakauma

Alkuperäisenä tarkoituksena oli käyttää mahdollisimman paljon neliön muotoista profiilia, jonka sivun pituus oli 100 mm. Kuitenkin ajoneuvolta haluttujen tiettyjen ominaisuuksien ja teknisten ratkaisujen takia, tähän ei joka tapauksessa pystytty. Taulukossa 4 on esitetty kaikki käytetyt profiilit ja niiden mitat. H on sivun korkeus, B on sivun leveys, ja S on profiilin paksuus. Kuvassa 8 on hyvin nähtävissä, minne erikokoiset profiilit sijoittuvat. Punaisella värjätyt profiilit ovat heikompaa AW-6063-T6-alumiinia ja harmaat taas vahvempaa AW-6082-T6-alumiinia. Profiilien lisäksi korissa on käytetty myös AW-6082-T6-alumiinilevyä. Levyä on käytetty ajoneuvon pohjassa sekä iskunvaimentimien kiinnityksissä.

Taulukko 4. Käytettyjen profiilien mitat, nimet ja määrä

Nimi	H (mm)	B (mm)	S (mm)	Määrä
AW 6082 100 x 100 x 5	100	100	5	23
AW 6082 100 x 50 x 4	100	50	4	10
AW 6082 150 x 100 x 5	150	100	5	11
AW 6063 100 x 100 x 4	100	100	4	13
AW 6063 60 x 30 x 2,5	60	30	2,5	3

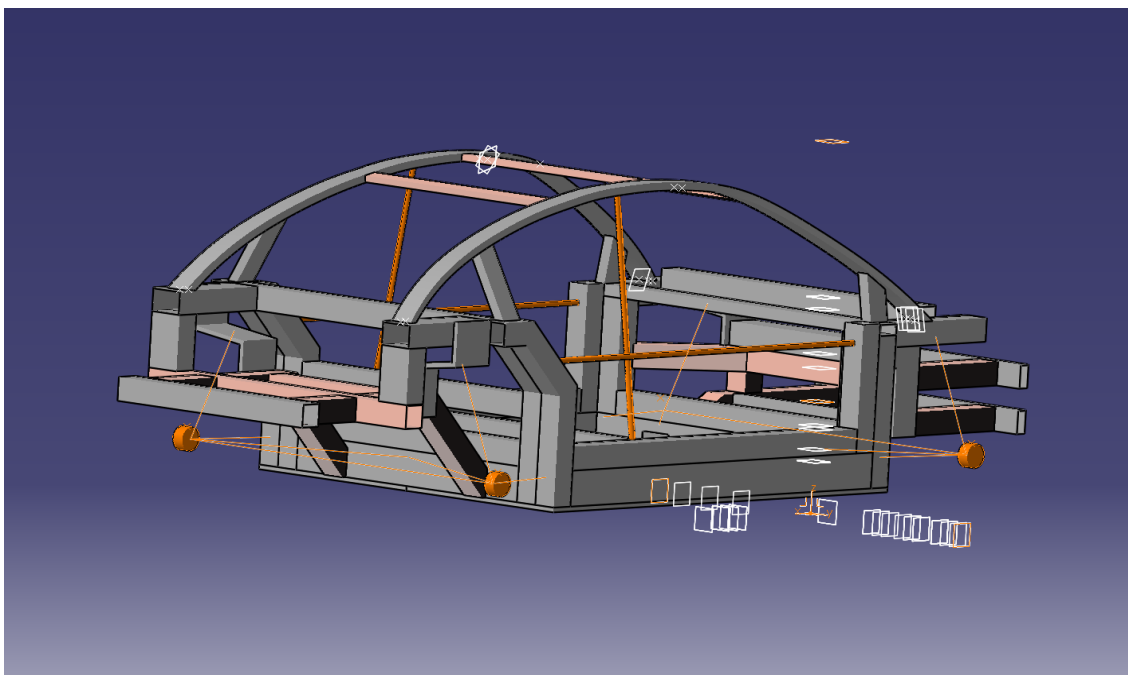
Ajoneuvon kori koostuu 60 eri osasta, joista jokainen on alumiiniprofiilia. Lisäksi on 6 osaa alumiinilevyä. 44 profiiliosista on suunniteltu tulevan vahvemmassa seoksesta, kun taas 16 on suunniteltu tulevan heikommasta. Tavoitteena oli pitää erilaisten profiilien määrä pienenä ja siinä onnistuttiin kohtuullisesti. Kattoprofiilien tuet ovat ainoat kokoa 60 x 30 x 2,5 mm johtuen katon kaartuvuudesta. Kattoprofiilien muotoa tulisi parantaa ja näistä vähän käytetyistä profiileista tulisi päästä eroon, mikäli valmistuskustannukset halutaan pitää alhaisina.

## 7 Lujuuslaskenta

### 7.1 Lähtökohta

Korille suoritettut analyysit ovat samat kuin Metropolian aiemmassa BioFore-ajoneuvoprojektissa. Suoritettut analyysit perustuvat Jaakko Väisäsen tekemään diplomityöhön Aalto-yliopistolle aiheesta ”Sizing of a composite vehicle frame” [17], jossa käsiteltiin Metropoliaassa valmistettua BioFore-autoa. Diplomityössä keskitytään hiilikuitukorin käytökseen, mutta suoritettavat ajotilanneanalyysit ovat kuitenkin samat molemmissa tapauksissa. Merkittävänä erona on kuitenkin eri ohjelmistojen käyttö. Tämä opinnäytetyö on tehty täysin Dassault Systemin Catia-ohjelmistolla, jonka analyysityökalut eivät ole yhtä kattavat kuin diplomityössä käytetyn ohjelmiston.

Työn aloittamiseksi Catian GSA-ohjelmistolla piti koriin mallintaa apurunko, jotta voimat ja kiinnitykset saatiin yhdistettyä runkoon. Apurungon materiaaliksi määriteltiin luonnoton materiaali, jolle annettiin myötörajaksi 1000 GPa ja vetolujuudeksi 1 GPa. Lisäksi viivamallina toteutetun apurungon palkkien paksuudeksi määriteltiin 20 mm. Tällä ratkaisulla voimat kuormittavat suunniteltua koria ja energiaa ei huku apurungon muodonmuutoksiin. Lisäksi koriin mallinnettiin ovia kuvaavat teräsputket antamaan lisäjäykkyyttä korille. Teräsputkien halkaisija on 20 mm ja paksuus 1,5 mm. Teräs on Catian katalogista löytyvä eikä siihen tehty muutoksia. Kuvassa 9 on nähtävissä apurunkojen ja ovien toteutukset. Koriin ei mallinnettu tuulilasia, mikä lisää vääntöjäykkyyttä noin 30 %. [17]



Kuva 9. Apurungot ja ovikorvikkeet korostettuna oranssilla

Yhteydet eri osien välillä GSA:ssa luotiin General Analysis Connection -työkalulla ja jokainen niistä yhdistettiin toisiinsa Smooth Connection Propertyllä. Näin kaikki tarvittavat yhteydet eri osien välillä saatiin luotua. Ohjelmistolla oli myös mahdollisuus luoda kaikki yhteydet hitsisaumoina, mutta laskentaa suorittaessa ohjelmisto kaatui tietokoneen muistin loppuessa kesken, jolloin päädyttiin käyttämään General Analysis Connection -työkalua.

## 7.2 Pohjalaskelma

Testien pohjana toimi Väisäsen diplomityössä määritetyt kuormitukset ja dynaamiset ajotilannetarkastelut. Erilaisia tapauksia on yhteensä viisi, joista ensimmäinen on ajoneuvon pitkittäissuuntainen vääntyminen. Toinen ja kolmas on testi jarruvoimien vaikutuksista koriin etu- ja taka-akselilla, joka sisältää vertikaalisen vakiokuormituksen. Neljäs ja viides testi taas tarkastelee voimien vaikutuksia ajettaessa kurveissa etu- ja taka-akselilla. Myös näissä otetaan huomioon vertikaalinen vakiokuormitus.

Joitakin tapauksia ei ole huomioitu, sillä ne eivät ole kriittisiä eivätkä vaikuta lopulliseen suunnitteluun. Esimerkiksi staattinen taipuminen (moottorin ja matkustajien staattinen



massa jne.) ja staattiset kulmavoimat (diagonaaliset renkaat on nostettu ilmaan) on jätetty huomioimatta. Ajoneuvon massaksi on määritetty 1700 kg ja sen painojakaumaksi on oletettu 50:50. Ulkoisten voimien suuruudet ja asetetut rajoitukset korin liikkeille on esitetty taulukossa 5 sivulla 29.

### 7.2.1 Tapaus 1 Vääntöjännitys

Vääntöjännityksellä määritellään ajoneuvon pitkittäissuuntainen vääntyminen. Korin jäykkyydellä on erittäin suuri merkitys ajoneuvon ajettavuuteen, mukavuuteen ja suorituskykyyn. Testi tehdään kuormittamalla molempia eturenkaita  $\pm 8000\text{N}$  voimalla. Etuakselin siirtymä kertoo korin vääntöjäykkyyden. [17]

### 7.2.2 Tapaus 2 ja 3 Jarruttaminen

Ajoneuvon maksimi -hidastuvuus määritellään laskemalla ajoneuvon hidastuvuus nopeudesta 100 km/h nolleen, kun alustana toimii kuiva tie ja jarrutusmatka on 50 metriä. Kaavana laskussa toimii yleinen kiihtyvyyden kaava ( $v_f = v_i + at$ ). Vastaukseksi saadaan  $19,6 \text{ m/s}^2$ .

Pitkittäissuuntainen kuormitus määritellään seuraavasti [17]:

$$P_x = (M g L_r + M a h)/L \quad (1)$$

missä  $Mg$  on ajoneuvon massa,  $L_r$  on etäisyys taka-akselin ja painopisteen välillä,  $a$  on kiihtyvyys,  $h$  on painopisteen korkeus ja  $L$  on etu- ja taka-akselin välinen etäisyys.

### 7.2.3 Tapaus 4 ja 5 Kaarreajo

Sivuttaisvoima saavuttaa maksiminsa, kun vastakkainen rengas nousee ilmaan ja kaarteiden säde on suurimmillaan. Sivuttaisvoima on määritetty seuraavasti [17]:

$$P_y = \frac{(M g t L_f)}{2 h L} \quad (2)$$

jossa  $t$  on ajoneuvon akselin pituus ja  $L_f$  on etuakselin etäisyys painopisteestä.

#### 7.2.4 Tapaukset 2--5 vertikaalinen vakikuormitus

Vertikaaliset kuormitukset on määritelty seuraavasti [17]:

$$P_z = \frac{M g w}{4} \quad (3)$$

jossa  $w$  on painojakauma etu- ja taka-akselin välillä. Ajoneuvon massa on jaettu neljään, koska kuormitus on tarkoitettu jokaiselle renkaalle erikseen.

#### 7.2.5 Yhdistelmäkuormitus

Vertikaalinen kuorma on aina olemassa normaaleissa ajotilanteissa. Pitkittäis- ja sivuttaisvoimat tuotetaan vain omissa tapauksissaan. Ajoneuvovalmistajien keräämän datan perusteella staattisia voimia tulee kasvattaa annetuilla kertoimilla

- Pitkittäissuuntaan 1.0
- Sivuttaissuuntaan 2.0
- Korkeussuuntaan 3.0

tavallisille tieajoneuvoille.[17]

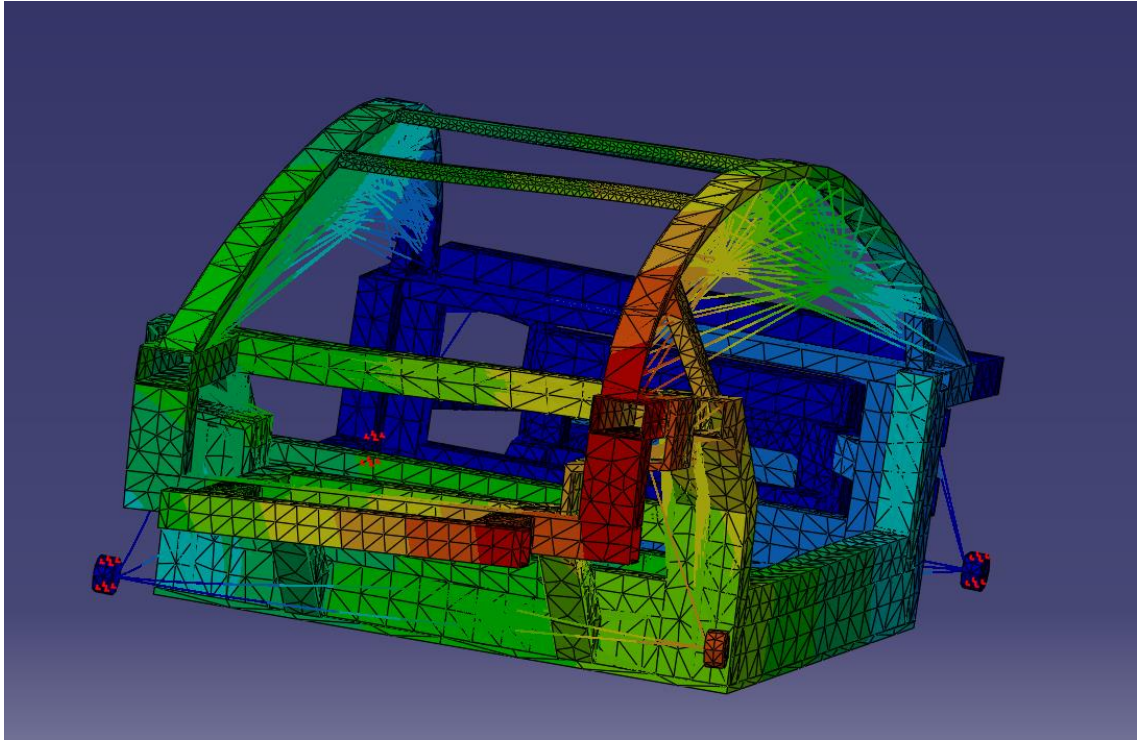
Taulukko 5. Ulkoiset voimat ja liikkeen rajoitukset

Tapaus	Suunta	Etu oik. [N]	Etu vas.[N]	Taka oik. [N]	Taka vas. [N]
1	x	0	0	Lukittu	Lukittu
	y	0	0	Vapaa	Lukittu
	z	8000	-8000	Vapaa	Lukittu
2	x	Lukittu	11542	Lukittu	Lukittu
	y	Lukittu	0	Lukittu	Vapaa
	z	Lukittu	12508	Lukittu	Lukittu
3	x	Vapaa	Lukittu	11138	Lukittu
	y	Lukittu	Lukittu	0	Lukittu
	z	Lukittu	Lukittu	12508	Lukittu
4	x	Lukittu	0	Lukittu	Lukittu
	y	Vapaa	31188	Lukittu	Lukittu
	z	Lukittu	12508	Lukittu	Lukittu
5	x	Lukittu	Lukittu	0	Lukittu
	y	Lukittu	Lukittu	29713	Vapaa
	z	Lukittu	Lukittu	12508	Lukittu

### 7.3 Tuloksien tulkinta

Jokaiselle mittaukselle luotiin oma kuormitustapaus Catia-ohjelmistossa. Näin ollen pystyttiin määrittämään oikeat arvot ja lukot tapauskohtaisesti ilman, että jokaisen testin jälkeen tarvitsi poistaa asetettuja arvoja, vaan voitiin palata helposti takaisin edelliseen mittaukseen.

Kuvissa 10 ja 11 esiintyvät värit tarkoittavat seuraavaa; Sinisellä värjätty alue on liikkunut kaikista vähiten alkuperäisestä asennosta, kun taas punainen on liikkunut kaikista eniten. Väliin jäävät värit ovat järjestyksessä pienimmästä suurimpaan vaaleansininen, vihreä, keltainen ja oranssi. Kuvassa 10 on havainnollistettu, miltä kuormitetut 3D-mallit näyttävät FEM-analyysissä.

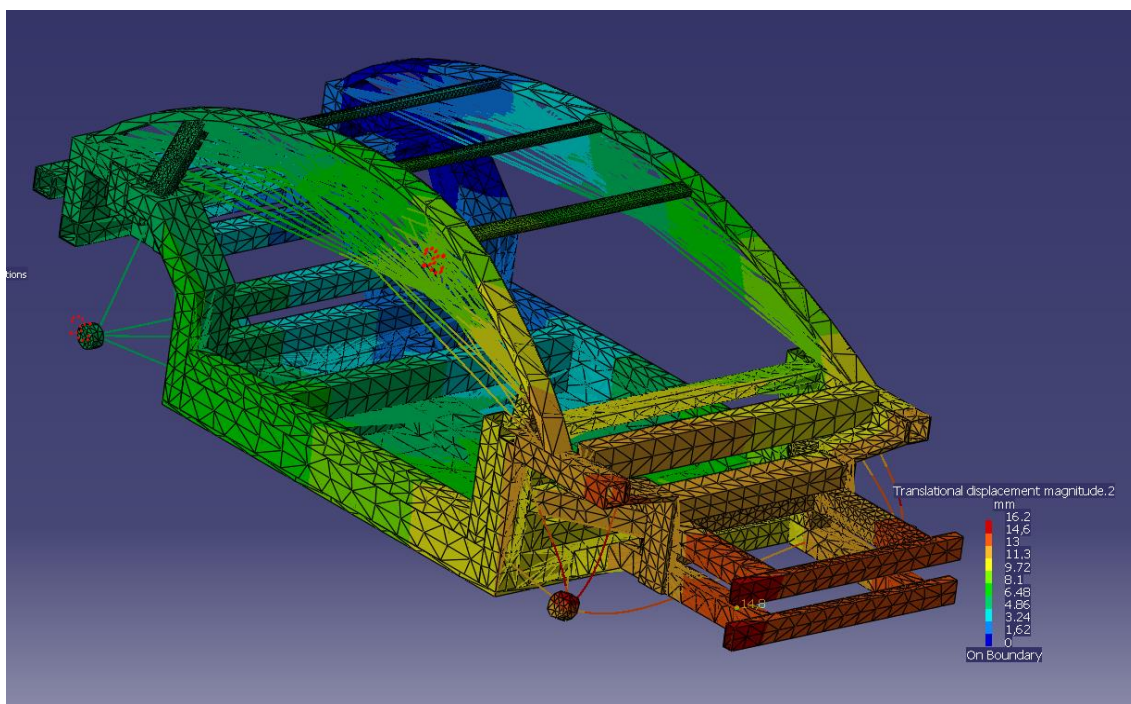


Kuva 10. Kuva kuormitetusta 3D-mallista. Kyseessä tapaus kolme.

Jotta tulokset olisivat helpommin nähtävissä kuvista, niin Catiassa on käytetty Amplification Magnitude -työkalua, jolla voidaan simuloida tapahtuvaa liikettä ja lisätä sen voimakkuutta. Kaikkiin tapauskuviin on laitettu noin nelinkertainen vahvennus, jotta kuvat olisivat visuaalisesti helpommin havaittavia. Liikkeiden suuruudet ovat kuitenkin muutamia millimetrejä, minkä vuoksi erottaminen ilman vahvennusta olisi hyvinkin vaikeaa.

## 8 Lopputulos

Lopputuloksen kannalta tärkeintä oli, että ensimmäinen tapaus tuotti järkevän tuloksen, jolloin voitiin todeta muidenkin mittausten olevan toimivia. Vääntöjännitys laskettiin vertaamalla sen korin pisteen sijaintia, joka oli liikkunut eniten ja saman pisteen alkuperäistä sijaintia. Tulokseksi saatiin 17000 Nm/aste, joka on hiukan korkea nykyaikaiselle ajoneuvon korille, mutta silti hyväksyttävä mittaustulos. Kuvassa 11 on esitetty ensimmäisen tapauksen tulos, josta on laskettu korin vääntöjännitys. Muissa tapauksissa korin vääntyminen kuormitetulla voimalla näyttää loogiselta, joten voimme olettaa, että myös muut tapaukset toimivat halutulla tavalla. Tuloksia tarkastellessa voimme huomata korin kuormittuvan eniten sen kulman kohdalta, josta koriin kohdistuu suurin voima kuten kuvassa 10.



Kuva 11. Vääntöjännitysanalyysi

## 8.1 Tarvittavat muutokset

Projekti on vasta alkutekijöissään, joten huomattavan paljon muutoksia on tulossa, ennen kuin ajoneuvo on valmis. Tekijän mieleen jäi kuitenkin joitakin kohtia, joita olisi syytä miettiä hieman tarkemmin tässä vaiheessa työtä.

### 8.1.1 Akusto

Ajoneuvon lopullisten muotojen varmistuessa olisi syytä kiinnittää huomiota varsinkin ajoneuvon pohjan suunnitteluun. Tämänhetkinen malli on riittävän tilava annetuille akuille, mutta akkujen muotoa ei ole paljastettu ja on mahdotonta sanoa voidaanko akustoa edes jakaa kahteen osaan.

### 8.1.2 Profiilien muotoilu

Tärkeä asia pitää mielessä on alumiiniprofiilien käyttö valmistuksessa. Varsinkin lujemman alumiinin taivuttaminen ja muokkaaminen voi olla hyvinkin hankalaa. Mikäli materiaalin käytöstä ei ole aiempaa kokemusta, tulisi sen muodonmuokkaus kykyä testata, ennen kuin sille ryhdytään suunnittelemaan liian monimutkaisia muotoja.

### 8.1.3 Jousituksen kiinnitys ja toteutus

Koriin suunnitellut iskunvaimentimet ja jouset ajateltiin tässä vaiheessa toteuttaa MacPhersonin mallin mukaisesti. Kiinnityspisteet suunniteltiin vain hyvin tilapäisesti, ja olisi suositeltavaa miettiä uudestaan niiden riittävän tukeva kiinnitys. Nykyisessä mallissa niiden tarkoitus on vain hahmottaa todennäköistä kiinnityskohtaa.

## 8.2 Yhteenveto

Korin FEM- laskentoja tehdessä huomattiin Catian olevan hiukan rajoitettu ohjelmisto tämän suuruisen projektin mallintamiseen. Kaikkia samoja ominaisuuksia, joita Jarkko Väisänen oli käyttänyt Kaupunkiauton mallintamiseen, ei ollut saatavilla, mikä vaikeutti huomattavasti mallinnuksen suorittamista. Suosittelemme simulaation suorittamista

jollain toisella ohjelmistolla, mikäli siihen on mahdollisuus. Projektin lopuksi saavutettiin asetetut tavoitteet. Projektin on tarkoitus jatkua opiskelijoiden tekemänä.

Opinnäytetyön voidaan todeta onnistuneen sekä oppilaitoksen että tekijän asettamien tavoitteiden mukaisesti. Asetettuihin tavoitteisiin päästiin ja saatiin myös uusia jatkokehittämisideoita. Suuri kiitos kuuluu opinnäytetyön rahoittajalle Henry Fordin säätiölle sekä Harri Santamalalle mahdollisuudesta tehdä työ.

## Lähteet

- 1 The Aluminum Automotive Manual. 2013. Verkkodokumentti. European Aluminium Association. <[http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/12/1\\_AAM\\_Body-structures.pdf](http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/12/1_AAM_Body-structures.pdf)>. Luettu 14.9.2015.
- 2 Audi Space Frame. 2014. Verkkodokumentti. Audi AG. <<http://www.audi-technology-portal.de/en/body/aluminium-bodies/audi-spaceframe-en>>. Luettu 7.9.2015.
- 3 Bunkley, Nick. 2015. Ford F-150 aluminum repair cost more than steel, IIHS says. Verkkodokumentti. Autonews. <<http://www.autonews.com/article/20150730/RETAIL05/150729842/ford-f-150-aluminum-repairs-cost-more-than-steel-iihs-says>>. Updated 30.7.2015. Luettu 14.9.2015.
- 4 Rautametallit. 2005. Verkkodokumentti. Tampereen teknillinen yliopisto Materiaaliopin laitos. <[http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv\\_4\\_1\\_4.php](http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_1_4.php)>. Luettu 27.8.2015.
- 5 Kivivuori, S. Härkönen, S. 2004. Lämpökäsittelyoppi. Helsinki: Teknologiateollisuus ry.
- 6 Carholt, Elin. 2015. Alumiiniseokset. Verkkodokumentti. Swecast AB. <[http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/metals\\_aluminum\\_FI.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/metals_aluminum_FI.pdf)>. Päiväty 28.1.2015. Luettu 23.3.2015.
- 7 Hall, Jody. 2011. Evolution of high strength steels in automotive applications Verkkodokumentti. General Motors Company. <<http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Great%20Designs%20in%20Steel/GDIS%202011/20%20-%20Jody%20Hall%20-%20Evolution%20of%20Advanced%20High-Strength%20Steels%20in%20Automotive%20Applications.pdf>>. Päiväty 18.5.2011. Luettu 7.9.2015.
- 8 Horst, Friedrich. 2006. Magnesium Technology. Berlin: Springer-Verlag
- 9 Aluminium AW 6082 T6 Rectangular. 2012. Verkkodokumentti. Ruukki. <<http://www.ruukki.com/Steel/Stainless-steel-and-aluminium-products/Aluminium-tubes/Aluminium-AW-6082-T6-rectangular>>. Päiväty 12.11.2012. Luettu 6.4.2015.
- 10 Aluminium AW 6063 T6 Rectangular 2012. Verkkodokumentti. Ruukki. <<http://www.ruukki.com/Steel/Stainless-steel-and-aluminium-products/Aluminium-tubes/Aluminium-AW-6063-T6-rectangular>>. Päiväty 12.11.2012. Luettu 6.4.2015.



- 11 Aluminium Alloys 101. 2015. Verkkodokumentti. The Aluminum Association.  
<<http://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101>>  
2015. Luettu 27.8.2015.
- 12 Lukkari, Juha. 2001. Alumiinit ja niiden hitsaus. Helsinki: Metalliteollisuuden  
keskusliitto MET.
- 13 Pienoisopas alumiinihitsaus. 2015. Verkkodokumentti. AGA.  
<[http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20Aluminum%20Welding%20Brochure%20105x210%20F1634\\_122433.pdf](http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20Aluminum%20Welding%20Brochure%20105x210%20F1634_122433.pdf)> 2015. Luettu 16.9.2015.
- 14 Hoang, N-H. Porcaro, R. Langseth, M. Hanssen, A-G. 2009. Self-piercing riveting  
connections using aluminium rivets. International Journal of Solids and Structures. Vol. 47, s. 427–439.
- 15 Truett, Richard. 2014. As Ford spends big, GM joins aluminum with simple welds.  
Verkkodokumentti. Autonews.  
<<http://www.autonews.com/article/20141124/OEM06/311249975/as-ford-spends-big-gm-joins-aluminum-with-simple-welds>>. Päiväty 24.11.2014. Luettu  
16.9.2015.
- 16 Alibeu, Séverine. 2010. En direct du Salon de Genève: le châssis en aluminium  
sophistiqué de la Fisker Karma. Verkkodokumentti.  
Caradisiac.<<http://www.caradisiac.com/En-direct-du-Salon-de-Geneve-le-chassis-en-aluminium-sophistique-de-la-Fisker-Karma-6738.htm>>. Päiväty  
4.3.2010. Luettu 1.4.2015.
- 17 Väisänen, Jaakko. 2012. Sizing of a composite vehicle frame. Master's thesis.  
Aalto University.